

リレー連載●事故解析の実際

ガラス破面のやさしい調べ方 (4)

上部 隆男

今回は強化ガラスの強化の原理と強化ガラスに起きためずらしい破壊、自爆について紹介する。

ガラスを強くする原理

ガラスは表面にキズを起点として引張応力によって破壊するので、強度を向上させるには表面のキズを除去し、引張応力に対向する力（圧縮応力）を表面に残せばよいことになる。

キズを除去する方法には、ガラス表面をバーナーで炙ってキズをなくす火みがきや、低濃度のフッ酸で表面を洗いキズをなくす酸みがきなどがある。

表面に圧縮応力を残す方法には、物理強化法と化学強化法があり、この処理をしたガラスはそれぞれ物理強化ガラス、化学強化ガラスと呼ばれる。

破片が細かいー物理強化ガラス

物理強化ガラスは、軟化温度付近まで加熱したガラスを急冷して表面に圧縮応力層を作ることから熱強化ガラスともいわれる。自動車の窓ガラス[†]、強化窓ガラス、ガラステーブルなど、一般に強化ガラスといえばこれを指す。強度は普通のガラスの3～5倍であるが、強化の方法によっては20倍になるものもある。破壊すると破片は細かく碎ける性質がある。

軟化温度付近のガラス板を炉外に取り出し、両面から空気ジェットで冷却すると最初は表面が内部より温度降下が速いため、表面に引張応力、内部に圧縮応力が発生する。

しかし、ガラスが軟化温度近くの高温にあるので、この応力はすぐに緩和され、表面と内部に温度差（ ΔT とする）があるにも拘わらず応力のない状態になる。

冷却率を一定に温度降下させると、表面と内部

の温度差 ΔT が保持されたまま応力のない状態で、冷却される。

表面が室温になった後、内部はさらに ΔT だけ温度が下がる。このとき内部は収縮するのでガラスの表面には圧縮応力が、内部には引張応力が残ることになる。図1に板厚方向の残留応力の分布を示す¹⁾。上下両表面には板厚の1/5程度の厚さに圧縮応力が分布している。板厚の3/5程度の中央部分は引張応力である。これらの応力はトータルではバランスが取られており、図1における圧縮応力の面積の和と引張応力の面積は等しい（ $A_1 + A_2 = B$ ）。

このガラスを破壊するためには表面の圧縮応力を打ち消し、なおかつガラスの強度を超える引張応力が必要である。

これを式にすると次のようになる。

「破壊に必要な引張応力」>「表面の圧縮応力」+「強化する前のガラスの強度」

「表面の圧縮応力」/「強化する前のガラスの強度」は強化により強度が何倍になったかを示す目安となる。「表面の圧縮応力」を大きくすればするほど強度の向上が期待できる。しかし物事はそう単純ではない。「表面の圧縮応力」を大きくすればするほど「内部の引張応力」が大きくなるからである。この「内部の引張応力」がガラスの強度を超えれば破壊する。したがって強化ガラスの強度は元のガラスの3～5倍というのが普通である。しかし、このように強化したガラスも金属や石など硬いものにより強化層（圧縮応力層）を突き抜け

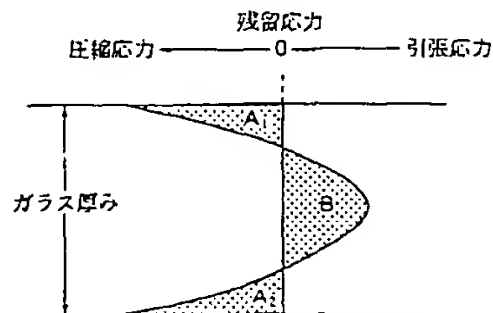


図1 物理強化ガラスの残留応力分布¹⁾

[†] 自動車のフロントガラスは以前は強化ガラスであったが、現在は合わせガラスになっている。

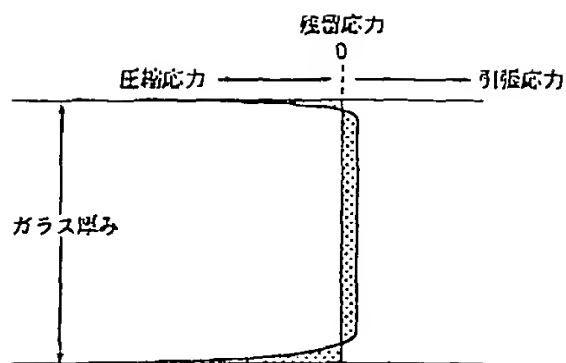


図2 化学強化ガラスの残留応力分布¹⁾

るキズが付くと内部の強い引張応力のため一瞬のうちに全面的にクラックが走り、ガラスはバラバラになってしまう。このため物理強化ガラスは強化後の切断・穴あけなどにはできないので、使用寸法のものを強化前に正確に注文する必要がある。

軽量ボトルでおなじみー化学強化ガラス

ガラス表面部のナトリウムイオンをこれよりイオン半径の大きいカリウムイオンに置換すると、本来ナトリウムイオンの入っていた小さな穴に大きなカリウムイオンが入るため表面に圧縮層ができて強度を上げることができる。イオン置換に時間を要するのでコストがかかるが、物理強化法の適用できない薄いガラスや複雑な形状のガラスにも強化をかけることができる。コピー機の書類保持板ガラス、腕時計のカバーガラス、眼鏡用レンズ、魔法瓶などはこれである。図2に板厚方向の残留応力の分布を示す¹⁾。イオン置換された時間に応じて圧縮応力の深さが決まる。その深さは通常、数10 μm 、深くても100 μm 程度である。圧縮応力が大きいにも拘わらず分布が浅いので圧縮応力に対応する面積は小さくなる。このため引張応力に対応する面積も小さくなり、引張応力は小さくなる。このため破壊したときでも物理強化ガラスのように細片にならず、強化後でも切断・穴あけなどができる。化学的強化法については成書²⁾が詳しい。

強化ガラスの自爆

ーある日突然 全面にヒビー

タイガーバルブ社のO課長が「今年のお盆は帰省ラッシュも例年になく空いてよかった」と額



写真1 ヒビだらけになった強化ガラス

に汗をかきながらやって来た。手にはビザバイの箱のようなものを大事そうに持っている。この会社は仕事柄、皆さんのお休みになるお盆が仕事の書き入れ時。止まっている機械の傍らで配管の修理・点検・部品交換と暇がない。そしてお盆明けのこの時期には残暑見舞いよろしくお土産を頂くことになる。箱を開けると、バラバラに割れたガラスの冷め切ったビザバイが入っていた(写真1)。

破損品は、冷却配水管のバタフライ式流量計の覗き窓で、直径15cm、2cm厚のソーダ石灰ガラス丸板で、物理強化したもの。定期交換のために在庫品(未使用品)の運搬時に破損したとのこと。ガラスは梱包もきちんとされており、運転も慎重におこなったので、特に大きな衝撃は与えていないという。在庫期間は3、4カ月のものである。

破損の状況

破損品は細かく破損しているように見えるが、未だガラスの表面は割れてなく薄皮一枚で繋がっており、テープでとめていなくともバラバラにはならない(ただしかなり丁寧な取り扱いが必要!)。破損品は枠に入っていたので破損しても原形を留め、テープで丁寧に固定したとのこと。破片が細かいこと、クラックが平面に直交していることなど物理強化ガラスの破壊の特徴を示している。クラックの直交している様子は、表面から背景が透けて見えることから、判断できる。

調べ方

クラックの形から破壊の開始点を見当つけ、断面方向から観察をした。板厚の中央部に破損の開



写真2 強化ガラスの破壊開始点近傍



写真3 破壊の開始点，ミラー面

始点が見つかったので，この破面をビデオマイクロスコープ，SEM-XMA（走査電子顕微鏡付きX線マイクロアナライザー）で観察した．開始点にクラックが観察されたので，このクラックが破損以前から存在したものか，破損後進行したものかについて特に詳しく観察した．

解析結果

クラックの断面方向から観察の結果（写真2）．



写真4 破壊の開始点（拡大写真）



写真5 異物(NIS?)のSEM写真

板厚の中央部にキズがあり，それを中心にミラー面，曇り面，ハックルと続いている．通常は破壊の開始点は表面にあるが，今回はガラスの中心部にあり，そこから破壊が進行している．さらに詳しく観察するためビデオマイクロで拡大した（写真3，倍率3.3倍．写真4，倍率71倍．）．

中心部のキズに見えたものは半球状の穴で，直径は約0.15mmである．半球から発達したと思われるクラックは，約0.22mmである．これが破損以前から存在したものか，破損後進行したものかを調べるため，この破面のもう一方の破面を見ると，同じように中心部には半球状の穴があり，同位置・同長のクラックもあった．このことからガラス内部に球状の穴とクラックが破損以前に存在していたことがわかる．

SEM観察をすると半球状の穴には異物らしきものがある（写真5）．さらにこの異物が何であることを確認するため，X線マイクロアナライザーによる元素

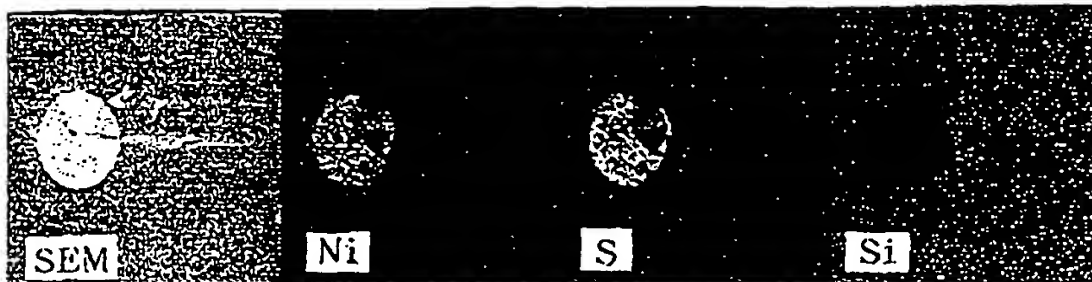


写真6 異物の面分析結果

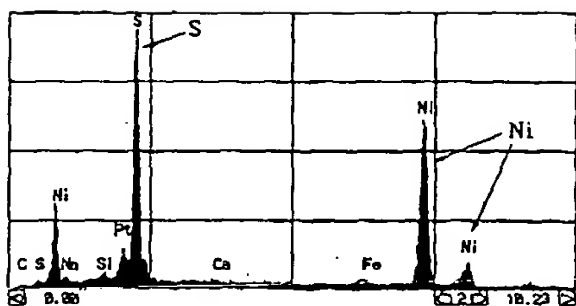


図3 異物のX線マイクロアナライザー定性分析結果

の定性分析(図3), と面分析(写真6)をおこなった。

定性分析からはNiとSが検出された。面分析からNiもSも全面に均等に分散しているので異物は硫化ニッケル(NiS)であると思われる。

NiSはガラス中に不純物として微量存在するが、物理強化ガラスではこれが大変な問題を起こすことがある。物理強化ガラスは表面の圧縮応力層に対応して内部に引張応力層があり、この層に微小な異物が存在すると、これが原因で特に外力を加えなくても自然に破壊することがある。自然破壊または目爆という。特にNiSの球状粒子は高温安定型の α -NiSから低温安定型の β -NiSに転移するとき体積膨張するのでクラックを進展させ破壊を引き起こす。

本件は丸板ガラス中に存在したNiSが強化処理の高温で α -NiSになった後、急冷されたためスムーズに β -NiSに転移できず大部分 α -NiSのまま凍結されたものと思われる(写真4の半球状の穴)。この α -NiSが在庫中に β -NiSに転移し、その体積膨張で進展したクラック(写真4のクラック)に中央部の大きな引張応力が加わりここを開始点として目爆したものと推定される。

こうしたNiSによる目爆は極めてまれに起きる事故であるが、これをなくすには基本的にはNiSの

ないガラスの製造が必要である。しかし、現実には難しいので、品質管理的には、工場内で出荷前に自爆させるHeat-Soak法というものが行われている。その原理のひとつは、NiSが380℃を境に $\alpha \rightarrow \beta$ 転移をすることを利用し、強化品を200℃から380℃の電気炉に10分から300分置くことにより、 α 型から β 型への転移を促進して自爆させる方法である。

もうひとつは700から950℃の電気炉に強化品を入れ、10～200秒急速加熱するもの。この原理は $\alpha \rightarrow \beta$ 転移を促進するものではないが、急速加熱によりガラス表面に生じた圧縮応力が内部の引張応力を大きくすることを利用して、後日自爆の恐れのあるものを前もって自爆させる方法である。両法を併用するのが理想的であるが、コストや設備の面でなかなか難しい。

ポイント7: 一般に割れた2つの破面は同じ模様でオス型、メス型の関係にある! 破面に不審なキズなどがある場合、破壊前に存在したものか、破壊後につくられたものかの判断は重要で、2つに割れた破面の双方に同じキズなどがあるかないかを確認すればよい。

参考文献

- 1) 新木信夫: 材料科学, 19, 307-312 (1983)
- 2) 牧島亮男: 「機能性ガラス入門」(アグネ), p.75 (1987)

(うわべ・たかお/東京都立産業技術研究所)

10月号p.63図2の○の表示に誤りがありました。誤りで訂正いたします。

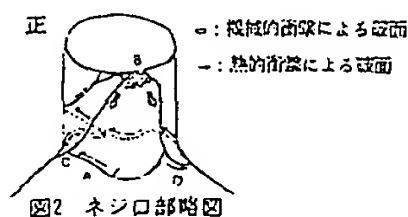


図2 ネジ口部略図

高速化、効率化に新時代到来。
常識破りのマシン、Speedy Hawks。

炭酸ガスレーザー加工システム

TLN-510-¹⁵/₂₀/₃₀ F-PC

レーザー加工の高速化と作業性の向上を目的に新開発。
新駆動方式採用の炭酸ガスレーザー加工システム。

F0157AAE
68(11)
1998.11.

科学技術振興事業団

1 899991

2 822008

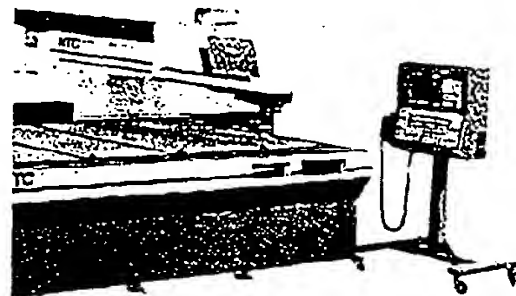
コ (無) BD I G2

審議件数	和文評議件数	英文評議件数
115		

19981079521
1998.11.04



英抄



炭酸ガスレーザー加工システム

TLN-510-¹⁵/₂₀/₃₀ F-PC

特

長

仕

様

フロントオープン

作業性、操作性が向上しました。

省スペース設計

全軸光移動方式により設備スペースが当社従来比の75%になり、スペースを有効に活用できます。

高速・高精度

カンチレバータイプでありながら、高速・高精度に切断が可能。

生産性の向上

パレットチェンジャーの動きを必要最小限にし、アイドルタイムを短縮しました。

(パレット交換時間当社従来比30%に短縮)

異形ワークの切断

上パレットは平板、下パレットは箱形ワークの切断も可能。

FMC

豊富なFMC用バリエーション。

レーザー加工範囲	1.5, 2.0, 3.0kw
レーザー発振器の出力	1,500W
パレットチェンジャー	2パレット
パレット走行速度	30m/min
所要床面(WXD)	9,430×3,750mm
加工機の重量	8,000kg

NTC NIPPEI TOYAMA Corporation

株式会社 日平トヤマ

本社 東京 豊島区 西池袋4-26-2 大森ビル808号 電話 03-5471-7701
東京営業所 東京都品川区 西大井6-26-2 大森ビル808号 電話 03-5471-7701
関東営業所 東京都板橋区 板橋1621 大森ビル 電話 0276-46-8737
名古屋営業所 名古屋市中村区 名駅4-6-23 大森ビル 電話 052-582-2805
北陸営業所 富山県富山 富山駅前100 電話 0763-22-2153
大阪営業所 大阪府大阪市 南大町1-6-14 イトワビル6F 電話 06-252-8483
広島営業所 広島市中区 大手町1-1-28 河内ビル 電話 082-245-3731

定価 1,890円

本体 1,800円